Т

程

技

衏

深層崩塌之地貌特徵

-以台灣南部地區爲例

魏倫瑋* 羅佳明** 鄭添耀*** 鄭錦桐**** 冀樹勇****

摘要

近年來由於全球氣候變遷,導致極端氣候發生之頻率增加,除了極端豪雨事件的影響以外,其 暴雨亦導致地質災害之規模加劇,如民國 98 年 8 月 9 日的莫拉克颱風,即在單一颱風事件中降下 台灣地區近一年的平均雨量,豪雨沖刷地表,並滲入地下形成地下水,使地下水位快速上升,導致 深層崩塌之發生(如小林村之災變)。深層崩塌之崩塌量體與崩塌影響範圍均遠大於淺層崩塌,因 此,如何利用地表地貌特徵判釋可能發生深層崩塌之區位,以提供該資訊給相關單位作為未來災害 防救的規劃與參考,遂成為目前極為重要之議題。

本文即針對民國 98 年莫拉克颱風期間,南部地區發生深層崩塌與堰塞湖之區位進行地表地貌 特徵之判釋與歸納,根據歸納研究之結果,深層崩塌之類型可分為(1)岩體滑動(Rockslide)或 潰坐型(Slump)深層崩塌、(2)溪流兩岸岩屑崩滑(Debris Slide)轉岩體滑動型深層崩塌與 (3)岩體滑動轉岩屑崩瀉(Debris Avalanche)型深層崩塌等 3 種類型,且各類型崩塌之發生 區、堆積區、谷口地形等地貌皆有不同之特徵,後續即可依此作為深層崩塌潛勢評估參考依據。 關鍵字:深層崩塌、大規模崩塌、極端氣候

一、前言

隨著全球氣候變遷之影響,高強度、長延時 之降雨頻率漸增,大幅增加深層崩塌發生之機 率,而此類大規模崩塌對於環境、居民等莫不造 成極大之影響,此議題也突顯深層崩塌形成之事 前判斷與評估極為重要,尤以日本、澳洲及義大 利等國家最為重視此議題(日本土木研究所, 2008 ; Leventhal and Kotze, 2008 ; Cardinali *et al.*, 2002) •

民國 98 年的莫拉克颱風由於引進強烈西南 氣流,在台灣中南部地區四天內降下近一年的雨 量,引發許多大規模深層崩塌,重創中南部山 區,嚴重威脅居民生命財產安全,而深層崩塌可 能進一步導致堰塞湖的形成,更造成下游保全對 象安全上之疑慮。

^{*} 中興工程顧問社防災科技研究中心助理研究員

^{**} 中興工程顧問社防災科技研究中心前副研究員

^{***} 中興工程顧問社防災科技研究中心研究助理

^{****} 中興工程顧問社防災科技研究中心副經理

^{*****} 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心經理

於民國 98 年 8 月 9 日莫拉克颱風引致之極 端豪雨造成高雄市獻肚山大規模崩塌,以及民國 99 年 4 月 25 日國道 3 號 3.1K 附近之順向坡崩塌 等災變均為近年來最嚴重之深層崩塌案例,其中 台灣西南部地區於莫拉克颱風來襲期間受災甚為 嚴重,於高屏溪與士文溪流域內更發生多處深層 崩塌與堰塞湖,本文遂歸納台灣南部流域過去導 致堰塞湖生成之深層崩塌地貌特徵與崩塌條件, 以期對判釋其他未來可能發生大規模深層崩塌之 區位有所助益。

二、研究區域概述

高屏溪為台灣南部最主要河流之一,其發源 於玉山附近(海拔 3,952 公尺),主流全長 171 公里,流域面積達 3.257 平方公里,為全臺流域 面積最大、長度次長之河川,主要支流有荖濃溪 與旗山溪等。流域內地勢由東北向西南遞減,高 度落差近 4,000 公尺,地勢落差極大。流域之岩 層依其分布可分五類: (1)古生代至中生代之 黑色與綠色片岩,分布於流域之東南部;(2) 始新世至漸新世之黑色板岩與石英岩,分布於荖 濃溪以東,岩質堅硬,節理發達;(3)中新世 至上新世之砂岩與頁岩,分布於荖濃溪以西,二 仁溪以東之山地,岩質堅實,節理較少;(4) 更新世之古河流沖積層,屬第四紀之階地堆積, 形成台地而分布於各主支流之兩岸; (5) 新生 代河流沖積層,分布於下游之沖積平原。此外, 由於流域內地勢起伏甚大,使年降雨量時空分布 差異極大,以靠近中央山脈地區之 3,400 毫米最 高,平地及沿海地區之 2,000 毫米最低,降雨主 要集中於 5 到 10 月間的雨季,約佔年降雨量的 90%,豐、枯水期落差明顯。

士文溪為率芒溪之支流,發源於春日鄉大漢 山(標高 1,704 公尺)西麓,率芒溪全長約為 22.3 公里,流域面積為 89.61 平方公里,整體地 勢自東向西遞減。流域出露之岩盤屬於台灣南部 亞變質岩區地層,由中新世之沉積岩層受輕微區 域變質作用而形成。流域位於恆春半島上,屬熱帶季風氣候型態,年雨量約為為 3,000 毫米,降雨集中於 5~10 月的雨季,雨季雨量約佔全年降雨量的 90%,乾、濕季降雨落差甚大。

三、深層崩塌之地形與地貌特徵

有關深層崩塌之定義世界各國有不同看法。 日本對於深層崩塌之定義,為崩塌深度超過3公 尺以上且發生於岩體(岩盤)之山崩,即認定為 深層崩塌;而歐美地區則多定義於地表下深度超 過2公尺以上之山崩類型。然而,台灣山區地質 脆弱,加以造山運動頻繁,導致山區岩坡風化速 率較快、土壤厚度甚深,故以崩塌深度3公尺以 上定義為深層崩塌有不合適之處。

根據經濟部中央地質調查所對於深層崩塌之 定義,其深層崩塌之滑移面位於地表下5公尺至 10公尺以上,且具備顯著之高陡崩崖及坡趾處較 顯著的堆積區為其最重要的地形特徵。因此本文 採用滑移面達5公尺至10公尺以上深度之基 準,作為區分深層崩塌與淺層崩塌之分界。

Soeters 與 Van Western 在 1996 年曾提出各 山崩類型判釋之準則,其方法乃根據影像內崩塌 地呈現之地貌特徵、植生及排水狀況等作為航照 判釋基準 (Soeters and Van Western, 1996), 並 可區分淺層崩塌及深層崩塌等型態(表 1)。此 外,日本土木研究所於 2008 年亦提出日本深層 崩塌潛勢溪流檢出方法說明書(日本土木研究 所,2008),其中深層崩塌各部位之地形特徵包 含山頂緩坡面(圖1之b)、雙重(多重)山陵 (圖 1 之 c 與 d)、張裂縫(圖 1 之 e)、反斜 崖地形 (圖1之f)、 弧狀張裂縫 (圖1之g)、 岩盤潛移坡面或地滑地形(圖1之h)以及遷急 線(圖 1 之 i)等。本文即基於過去文獻之判釋 方式,針對台灣南部流域之深層崩塌進行地表地 貌特徵歸納,以作為未來進行深層崩塌區位判 釋、範圍界定之依據。

I

程

技

術

山崩類型	於航照影像上山崩地形特徵、植生及排水狀況之判釋基準	
落石	地形特徵	一般坡度超過 45 度以上,其岩坡上常見裸露岩盤。亦可見到岩壁或自由面連接約 20~30 度之岩坡或崖錐堆積
	植生狀況	沿著落石路徑常見線狀植生痕跡分布,且岩坡上植生密度極低
	排水狀況	無具體之特徵
岩屑崩滑	地形特徵	其崩塌面多具平面之特徵;崩塌體深度(D)/長度(L) < 0.1
	植生狀況	其源頭區與運動路徑裸露,且崩塌體與周緣植生具明顯之差異
	排水狀況	雜亂或樹枝狀水痕常見於崩塌邊緣,且水痕常於趾部偏轉或終止
岩體滑動 (深層崩塌)	地形特徵	於地形上常見反凸狀之特徵,其邊界亦具有明顯之雙溝同源特徵;具半月形冠部、反斜崖、圓丘狀堆積等特徵;其崩塌體深度(D)/長度(L)在 0.3~0.1 範圍內,一般坡度分布在 20~40 度之間
	植生狀況	崩塌體內與邊界外植生分布相比,具明顯之擾動跡象,但與其它崩塌型態相比,深層崩塌 之堆積體上植生密度相對較高
	排水狀況	比較崩塌體與未崩壞之邊坡,常見不良之表面排水或水池於反斜崖、坡體或趾部區位附近

表 1 航照判釋山崩基準表(修改自 Soeters and Van Western, 1996)





符號說明:

a:主陵線,b:山頂緩坡面,c:雙重山陵,d:多重山陵,e:張裂縫,f:反斜 崖地形,g:弧狀張裂縫,h:岩盤潛 移坡面(或為地滑地形),i:遷急線

圖 1 深層崩塌各地形特徵示意圖 (修改自日本土木研究所, 2008)

四、深層崩塌特性歸納

本文根據莫拉克颱風後南部災區遙測影像判 釋與地形分析結果,進行深層崩塌的地形及地質 特性歸納。歸納項目包含地層結構、弱面型態、 崩塌特徵、崩塌堆積區形式、谷口地形等特性, 並蒐集歷史資料、航照正射影像、數值高程模型 與相片基本圖等資料,藉此探討深層崩塌歷史地 形演育及形成特性,並依此歸納出三種深層崩塌 型態: (一)岩體滑動(Rockslide)或潰坐型(Slump)
深層崩塌

此類型深層崩塌多分布於河道束縮段、隘口 或攻擊坡之區位,為最常見之深層崩塌類型。一 般多發生於臨河岸之逆向坡或高角度順向坡,崩 塌後易堆積出壩高甚高、堆積範圍較集中之天然 壩(圖 2),如荖濃溪上游近雲峰西側(圖 3a)與士文溪之深層崩塌轉為堰塞湖即為一例 (圖 4-a)。



河流侵蝕而向崩壁凹陷之現象,表示過去應已發 生過崩塌,其材料堆積於河道之上,然而該堆積 材料受河流侵蝕後,使趾部再次處於裸露、不安 定之狀態,且坡面上清晰可見主崩崖與兩處次崩 崖,在颱風豪雨沖刷下便發生深層崩塌。值得注 意的是,本次崩塌主崩崖上方尚有至少三處張力 裂隙,極可能成為未來深層崩塌發生區位之範 圍。



圖 3-a 莫拉克颱風後荖濃溪上游近雲峰西側深 層崩塌三維影像圖



圖 3-b 雲峰西側深層崩塌地貌特徵



圖 3-c 雲峰西側深層崩塌上方冠部與線形凹地



圖 2 岩體滑動或潰坐型深層崩塌機制示意圖

由 2008 年的福衛二號衛星影像上可以發現 (圖 3-b),雲峰西側在崩塌前,趾部已經有明 顯向源侵蝕與崩塌的跡象,呈現後退式的崩壞, 並可於崩塌位置上方發現多處張力裂隙的分布, 且本次深層崩塌的冠部亦清晰可見,冠部附近有 兩處線形凹地(圖 3-c),即為邊坡不穩定的跡 象。由於本處河道屬於攻擊坡,在莫拉克期間原 崩塌趾部受豪雨沖刷,使底部淘空進而發生深層 崩塌,復因本處河道甚為狹隘,崩塌材料直接堆 積於河道之上,便旋即於河道後方形成堰塞湖。

另由士文溪深層崩塌發生前之福衛二號衛星 影像判釋顯示(圖 4-b),該崩塌區位趾部有受



财圈法人中興工程顾問社

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

圖 4-a 莫拉克颱風後士文溪深層崩塌三維影像圖



圖 4-b 士文溪深層崩塌地貌特徵

(二) 溪流兩岸岩屑崩滑(Debris Slide) 轉岩 體滑動型深層崩塌

此類型好發於溪流兩岸已具有岩屑崩滑特徵 者,其山崩機制上,一開始以溪流兩岸侵蝕為 主,並逐漸轉為兩岸邊坡趾部附近之岩屑崩滑。 當岩坡趾部基質逐漸崩滑淘空後,岩坡便沿弱面 而崩塌,形成深層崩塌(圖 5)。此類型深層崩 塌多於溪流上游形成堰塞湖(圖 6-a 與圖 7-a), 當堰塞湖潰壩後則轉為土石流,並回堵主流形成 更大規模之堰塞湖,如旗山溪上游那瑪夏鄉附近 之堰塞湖即為一例(圖 8-a)。

其中荖濃溪上游段之深層崩塌(圖 6-a)具 明顯的雙溝同源特徵(圖 6-b),且從主崩崖滑 落的距離可知其活動性甚高,豪雨時雨水也更易 從主崩崖處入滲地下,減小崩塌阻抗力。崩塌坡 面上可見兩處次崩崖,趾部除了有橫向裂隙 (Transverse Cracks)外,亦可見輻射向裂隙 (Radial Cracks),顯示在崩塌發生前,趾部岩 屑崩滑已甚嚴重,面臨豪雨時即由岩屑崩滑轉發 生岩體滑動之深層崩塌。



圖 5 岩屑崩滑轉岩體滑動型深層崩塌機制示意圖



圖 6-a 莫拉克颱風後荖濃溪(上游段)深層崩 塌三維影像圖



圖 6-b 荖濃溪(上游段)深層崩塌地貌特徵

術

財團法人中興工程原問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

荖濃溪下游段深層崩塌在發生前(圖 7a),冠部處即可察知有二重山陵與線形凹地之 分布(圖 7-b),且坡面上存有一處岩屑崩滑崩 塌(圖 7-c),該崩塌下緣有舊有崩塌地堆積材 料,坡面上有多處次崩崖,並可發現山區道路有 崩滑移動之現象。舊有崩塌地堆積材料在非洪汛



圖 7-a 莫拉克颱風後荖濃溪(下游段)深層崩塌三 維影像圖



圖 7-b 荖濃溪(下游段)深層崩塌上方二重山陵 與線形凹地

期間可充作崩塌地趾部之支撐,然而在豪雨期 間,舊有崩塌地堆積材料受河流侵蝕沖刷,轉為 岩屑崩滑型態,並進一步導致崩塌地趾部淘空, 進而發生岩體滑動深層破壞。

那瑪夏鄉在莫拉克颱風期間發生多處深層崩 塌,並造成上游堰塞湖之生成(圖 8-a)。其中 A 崩塌(圖 8-b)在崩塌前已可於坡面上看見冠 部、主崩崖、頭部、次崩崖等特徵(圖 8-c), 且坡面上的溪流向源侵蝕甚劇,已經逼近次崩崖 位置,顯示該處水流向源侵蝕旺盛,更有助於頂 部崩塌之發生與河道上崩塌材料之堆積,一旦崩 積材料受豪雨沖刷運移後,坡趾即呈現淘空狀 態,頂部之岩層旋即形成岩體滑動破壞。

B 崩塌位於 A 崩塌下游對岸處(圖 8-d), 由崩塌前之影像可看見(圖 8-e),坡面上除冠 部、主崩崖、頭部等崩塌特徵外,尚可看見許多



圖 8-a 莫拉克颱風後旗山溪上游那瑪夏鄉之深 層崩塌三維影像圖



圖 7-c 荖濃溪(下游段)深層崩塌地貌特徵



圖 8-b 莫拉克颱風後那瑪夏鄉 A 深層崩塌

■財團法人中興工程 顔問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS,INC.



圖 8-c 那瑪夏鄉 A 深層崩塌地貌特徵



圖 8-d 莫拉克颱風後那瑪夏鄉 B 深層崩塌



圖 8-e 那瑪夏鄉 B 深層崩塌地貌特徵

次崩崖與裂隙分布,原已屬潛變型坡面,在豪雨 期間可能更趨不穩定,復以 A 崩塌之材料向下游 方向移動時可能刮蝕 B 崩塌之坡腳位置,促使 B 崩塌之發生,由此可知,深層崩塌之發生除造成 大量土砂崩落之災害外,其運移路徑上較不穩定 之坡面亦可能受到衝擊而崩壞,使崩壞之範圍、 土砂量更增大。

中興工程·第115期·2012年4月·PP. 35-43 http://www.sinotech.org.tw/journal/

C 崩塌位於那瑪夏鄉稍下游處之支流(圖 8f),於發生前,趾部可見先前舊崩塌崩落後殘留 之崩崖(圖 8-g),其崩塌材料堆積於該崩崖下 游匯流處,其上植生稀疏,顯示其可能為近期崩 塌之堆積,且有持續崩滑之現象。在趾部發生岩 屑崩滑後,上方岩體缺乏良好支撐,進而導致強 降雨時發生岩體滑動之深層崩塌。

D 崩塌位於 C 崩塌稍上游處(圖 8-h),由 崩塌前之影像可看見該崩塌除了具有冠部、主崩



圖 8-f 莫拉克颱風後那瑪夏鄉 C 深層崩塌



圖 8-g 那瑪夏鄉 C 深層崩塌地貌特徵



圖 8-h 莫拉克颱風後那瑪夏鄉 D 深層崩塌

崖、頭部等潛變特徵外(圖 8-i),其坡面上有至 少三處岩屑崩滑發生區位,且趾部亦有明顯溪流 沖刷之現象,為典型岩屑崩滑轉岩體滑動型深層 崩塌。



圖 8-i 那瑪夏鄉 D 深層崩塌地貌特徵

(三)岩體滑動轉岩屑崩瀉 (Debris Avalanche) 型深層崩塌

此類深層崩塌多位於地形坡度陡變之區位 (圖 9),常見於臨河岸支流發展旺盛之源頭 區,其支流源頭區左或右岸多為順向坡,另一岸 為逆向坡呈現易匯水之不利岩偰地形。而此類型 深層崩塌之源頭區或支流沿岸多處可見崩積層材 料堆積,當豪雨匯集於源頭區時,將帶動大部分 崩積層運移,並迅速侵蝕支流兩岸邊坡之北部, 導致兩岸岩體產生滑動。岩體滑動過程中,岩塊 將逐漸沿弱面崩解形成岩屑,當遇到高陡地形 時,將大幅增加山崩之運動速度,使其岩體滑動 轉變為岩屑崩瀉,亦或稱為坡面型土石流。其崩 塌材料一般甚為鬆散,崩塌後易堆積成壩高甚 低、堆積範圍甚廣之天然壩,往往容易直接威脅 臨河岸聚落之安全,如小林村獻肚山崩塌於楠梓 仙溪形成堰塞湖即為一例(圖10-a)。

由小林村崩塌區北側為順向坡(圖 10-b), 南側為逆向坡,共同形成不利岩偰地形,使其在 豪雨入滲,降低崩塌塊體底部摩擦阻力時,造成 大規模岩體滑動崩塌,且由於其崩塌區位坡高近 850 公尺,其崩塌物質受重力作用加速傾瀉而 下,即由岩體滑動轉為岩屑崩洩之災變。



财圈法人中興工程顾問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.



圖 9

圖 10-a 莫拉克颱風後小林村獻肚山深層崩塌三 維影像圖



圖 10-b 小林村獻肚山深層崩塌地貌特徵

五、結 語

本文根據深層崩塌特徵相關文獻回顧,針對 遙測影像之深層崩塌地貌表徵、線理特徵、地質 特徵等進行歸納,並將深層崩塌進一步分為 (1) 岩體滑動或潰坐型深層崩塌、(2) 溪流兩 岸岩屑崩滑轉岩體滑動型深層崩塌以及(3)岩 體滑動轉岩屑崩瀉型深層崩塌等三類,以期未來 能使用遙測影像與數值高程模型,從線理特徵與 地形地貌等資訊判釋深層崩塌邊界範圍,並輔助 崩塌機制之研判,藉此強化深層崩塌機制之解 釋。

本文所探討之深層崩塌案例,其崩塌土方量 遠大於淺層崩塌之量體,均具有形成天然壩且構 成堰塞湖之條件。然而,對於此類型之山崩,甚 難以定量方法決定其崩塌規模與深度。目前工程 實務上,主要透過以下方式取得其定量資訊:

- 鑽探及地球物理探測:此為最精準之定量資 訊,包含分析鑽取之岩心、進行地電阻或震測 等探測工作,然而此類工作往往所費不貲,且 探測選定之位置優劣將決定資料適用度。
- 地質調查:於崩塌週邊進行現場調查,以位 態、節理等資料與地形地質條件推論定量資 訊,惟此方法倚賴大量人力資源,若於調查範 圍甚廣時,詳細定量資訊即有蒐羅之困難。
- 數值及穩定分析方法:此方法以數值或穩定分 析軟體(如 MIDAS,可考量三維地形、地 層、弱面、降雨入滲、滲流方向及地震議題) 進行邊坡分析,以及蒐集到之參數推估崩塌規 模與深度,可有效且迅速得知定量資料,然而 部分參數取得較為不易。

本研究係以廣域判釋分析為主,需要豐富之 判釋與地質調查經驗,藉由此廣域判釋之結果, 可輔助鑽探、地物探測區位與地質調查場址之初 步選定,以降低探測區位或場址選定不佳所造成 之資源耗費。另藉由判釋結果可進一步利用數值 及穩定分析方法,推估不同雨量與地震條件下之 崩塌規模與深度,若能結合鑽探與地質調查資 料,將可促使深層崩塌相關研究之精確度,助於 未來災防之應用。

參考文獻

- 日本土木研究所(2008)深層崩塌潛勢溪流檢出方法說 明書,日本
- Cardinali, Reichenbach, Guzzetti, Ardizzone, Antonini, Galli, Cacciano, Castellani, and Salvati (2002) A Geomorphological Approach to the Estimation of Landslide Hazards and Risks in Umbria, Central Italy, Natural Hazards and Earth System Sciences, 2, pp.57-72
- Leventhal and Kotze (2008) Landslide Susceptibility and Hazard Mapping in Australia for Land-use Planning-with Reference to Challenges in Metropolitan Suburbia, Engineering Geology, 102, pp.238-250
- Soeters, R. and van Westen, C. J. (1996) Slope Instability Recognition, Analysis, and Zonation, Landslides, Investigation and Mitigation, Washington, D. C., National Academy Press, pp.129-177
- Tomas P., Veronika S., Jan Hradecky, Karel K. (2007) Landslide Dams in the Northen Part of Czech Flysch Carparhians: Geomorphic Evidence and Imprints, Geomorphological Carpatho-Balcanica, 41, pp.77-96
- 中央地質調查所地質資料整合查詢系統(2011) http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm